

С.Кузнецов, Б.Огнев, С.Поляков

## 4,5 КИЛОМЕТРА FSO-СОЕДИНЕНИЯ С ОПЕРАТОРСКОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ Практические результаты

### Введение

В настоящее время широкое распространение как средство доставки трафика на "последней миле", а также в качестве резервной, аварийной, временной и оперативной связи получили беспроводные [атмосферные оптические линии связи](#) (АОЛС, АОЛП, FSO). Наряду с основными преимуществами АОЛС (высокая скорость и скрытность передачи информации, быстрота развертывания, отсутствие лицензирования оптического диапазона, высокая помехозащищенность и т.д.) широко известен и их главный недостаток – зависимость доступности канала связи от погодных условий. Например, в условиях средней полосы России доступность беспроводного соединения по критерию 99,7% для [FSO-оборудования "Artolink" M1 FE-2A](#) (Fast Ethernet) обеспечивается на расстояниях только до 1,3 км.

Вместе с тем постоянно возникает потребность в использовании АОЛС и на большие расстояния. Однако в таких условиях доступность канала снижается. Для поддержания высокой надежности соединения предлагалось применение резервного радиоканала на основе систем широкополосного доступа Wi-Fi, которое, к сожалению, не дало положительных результатов [1, 3]. Только использование специально откалиброванного технического решения на базе оборудования "Рапира" позволило получить приемлемые на практике результаты. В настоящей статье приведены предварительные итоги шести месяцев испытаний в реальных условиях гибридного радиооптического оборудования "Artolink" модели M1 FE-2A-R (производитель – Государственный Рязанский приборный завод), поставки которого начались в начале 2008 г.

### Схема и методика измерений

Опытная линия связи была развернута на пролете длиной 4,5 км. На пути следования луча расположены заливные луга с двумя водоемами (в межсезонье там наблюдаются частые туманы, а летом – восходящие тепловые потоки) и участок окружной дороги. В состав оборудования M1 FE-2A-R входили два серийных приемопередающих модуля (ППМ) с интерфейсом 100Base-TX и поддержкой технологии "двойного канала" и откалиброванное для работы в качестве резервного канала оборудование preWiMAX, выполненное на основе продукции НПО "Рапира". Один ППМ был закреплен на стационарной опоре на крыше 6-этажного промышленного здания, а второй установлен по временной схеме на треноге на балконе 4-го этажа жилого дома. Питание осуществлялось по штатной схеме от устройства внешнего интерфейса (УВИ) с использованием кабеля длиной 50 м.

Схема включения измеряемого и тестового оборудования приведена на рис. 1.

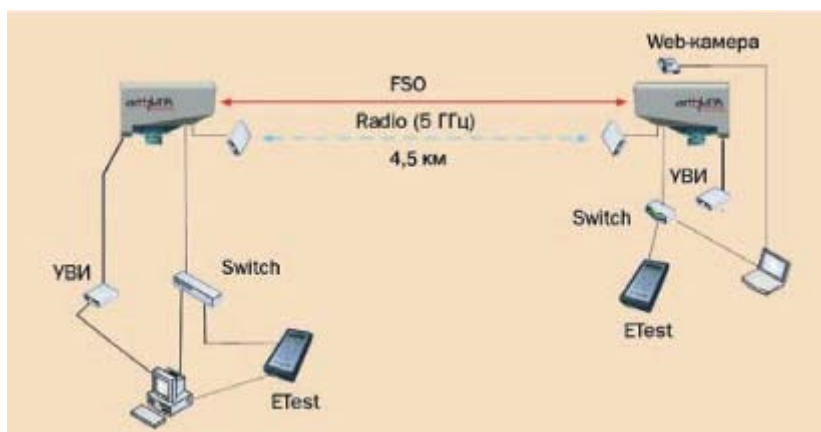


РИС. 1. Схема проведения измерений гибридного канала связи

Образующие оптический канал связи, ППМ через свои первые порты были подключены к коммутаторам Fast Ethernet, через вторые – к радиомодулям "Рапира", формирующим резервный канал на частоте 5,8 ГГц. С обеих сторон канала к коммутаторам подключались тестеры Ethernet ETest [4, 5] и два компьютера. Один из компьютеров (на схеме расположен слева) управлял процессом тестирования и мониторингом канала, а к другому была подсоединена Web-камера для наблюдения за трассой и хранения изображений.

В процессе непрерывной работы оборудования снимались следующие данные:

- параметры состояния обоих ППМ FSO-оборудования (вид рабочего в данный момент канала, температура внутри ППМ, параметры системы целеуказания и наведения);
- изображения трассы, полученные от Web-камеры;
- значения потерь пакетов, классификация секундных интервалов, значение эквивалентной битовой ошибки BER, получаемых от тестеров канала Ethernet [5].

Из полученных данных формировалась база первичных значений параметров. Периодичность записи в базу составляла 3 минуты, а общее время записи – шесть месяцев (с мая по октябрь 2008 г.). В течение этого времени с помощью двух тестеров Ethernet ETest проводилась генерация тестового трафика и анализ его прохождения по каналу связи. Тестовый трафик представлял собой трехминутные сеансы непрерывного следования пакетов Ethernet длиной 1518 байт и минимальным межпакетным интервалом согласно стандарту IEEE 802.3u.

Результаты

В качестве примера первичных данных на рис. 2 приведена зависимость эквивалентного BER, построенного с трехминутным шагом, в канале от времени за октябрь 2008 г.

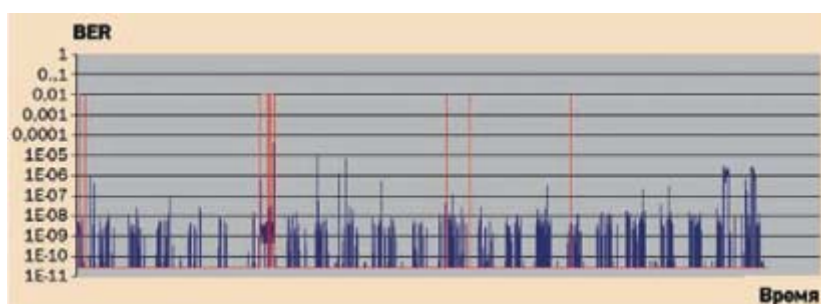


РИС. 2. Уровень BER и динамика переключений на резервный канал (за октябрь 2008)

На рисунке синим цветом обозначены значения эквивалентного BER, измеренного ETest по методике, приведенной в [5]. Вертикальные красные линии отмечают моменты перехода на резервный канал и обратно, то есть время работы на резервном канале. Результаты расчета усредненных характеристик каналов за весь период наблюдения приведены в таблице.

ТАБЛИЦА. Усредненные характеристики канала

Месяц	Доля времени работы линии по резервному каналу, %	Доступность канала связи без учета резерва, %	Доступность канала связи с учетом резерва, %	Расчетная доступность с "холодным" резервом, %
Май	0,676	99,324	99,9925	99,850
Июнь	1,421	98,579	99,9842	99,684
Июль	0,652	99,348	99,9928	99,855
Август	0,062	99,938	99,9993	99,986
Сентябрь	2,375	97,625	99,9736	99,472
Октябрь	2,290	97,710	99,9746	99,491
Средние значения за 6 мес.	1,327	98,673	99,9853	99,705

Из таблицы видно, что реальные результаты по доступности только оптического канала связи оказались лучше расчетных значений: 98,67% вместо ожидаемых 95,5%. Возможно, это связано с тем, что в период наблюдений не попали зимние месяцы. Использование резервного канала на основе откалиброванных решений позволяет существенно поднять доступность канала – практически до 99,99%. Это стало достижимым благодаря минимальному времени переключения – не более 2 с. Критерием переключения на резерв являлось значение ошибки более  $10E-4$ , возврат на оптический канал – 10 секунд безошибочной работы оптического канала. В табл. 1 также приведены расчетные значения доступности в допущении того, что оборудование резервного канала находится в "холодном" резерве (без подачи питания). В этом случае время переключения возрастает до 40 с, а доступность канала в результате составляет только 99,7%.

Следует отметить, что полученные значения доступности гибридного канала связи прямо зависят от качества оптического канала, поскольку интегральная доступность гибридного канала по существу определяется потерями времени на переключение. Использование в качестве основного оптического канала FSO-оборудования "Artolink" позволило получить такие высокие показатели на столь длинном пролете, причем без принятия специальных мер по закреплению оборудования, а только за счет реализованных технических решений, таких как:

- система автоматического наведения, которая в процессе эксплуатации беспроводного канала связи автоматически наводит ППМ друг на друга с максимальной точностью (0,08 мрад) независимо от подвижности опоры, на которой закреплено FSO-оборудование;
- использование трех синфазных передатчиков с узкой диаграммой направленности излучения (0,55 мрад), что необходимо для работы на дистанциях более 1 км для борьбы с турбулентностью атмосферы;
- встроенная защита от солнечной засветки, мощная оптическая селекция оптических помех в канале приема, а также малый угол поля зрения оптического приемника (3 мрад);

- применение технологии последовательного кодирования с многократным дублированием символов на основе HQN-турбокодов, специально адаптированной под передачу данных через атмосферу преимущественно в период ухудшения видимости из-за погодных явлений (туман, снег). Кроме того, в приемопередающем тракте оборудования реализована фирменная технология асинхронной передачи данных, исключающая паразитное воздействие фазового шума, свойственное системам с классической PLL;
- встроенный механизм контроля ошибок в оптическом канале с реализованным в *firmware* алгоритмом переключения между каналами. Все эти меры позволили минимизировать количество переключений и время работы на резервном канале и в результате получить достойные показатели доступности канала.

В ходе проведения измерений был выявлен ряд интересных динамических эффектов прозрачности оптического канала. Например, на рис. 3 показана ситуация, когда наблюдалось временное "просветление" оптического канала связи в условиях сильного тумана 08.10.2008 г. График иллюстрирует переход линии с резервного канала на оптический и обратно по мере ухудшения видимости. Соответствующим значениям ошибок сопоставлен вид трассы с камеры видеонаблюдения.

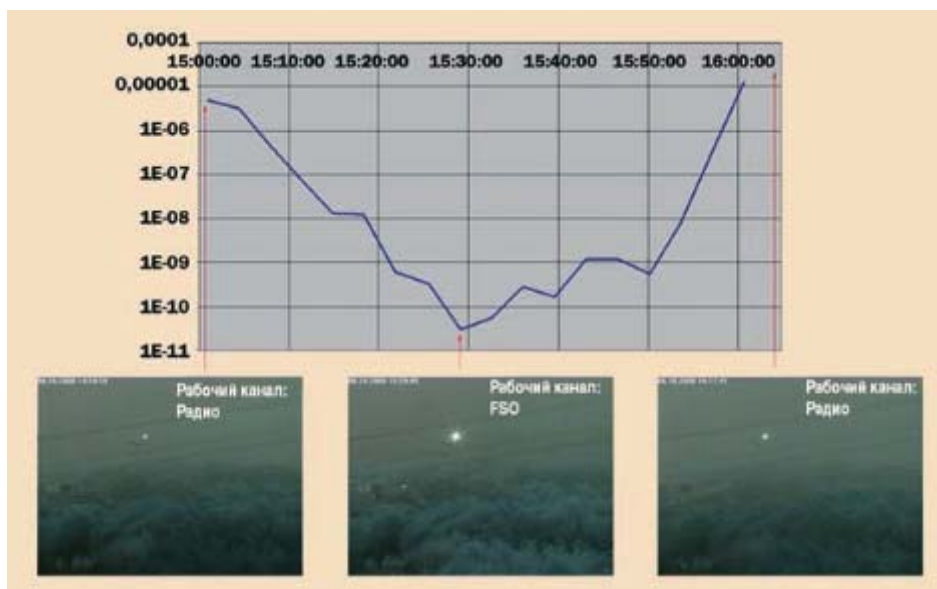


РИС. 3. Динамика ошибок в тумане

Из приведенного графика динамики ошибок видно, что характерное время существенного роста уровня ошибок (с 10E-9 до 10E-6) составляет около 10 минут. В данной ситуации (как показало тестирование, довольно типичной) снижение частоты в оптическом канале и переход на меньшую скорость передачи (к примеру, на 10 Мбит/с) практически бесполезны. Это дает выигрыш работы FSO-оборудования не более чем на 10 минут, после чего связь все равно прерывается. При этом реакции коммутационного оборудования, транспортных протоколов и прикладного программного обеспечения на снижение скорости не брались в расчет.

В заключение приведем анализ распределения переключений на резервный канал по времени суток. Результаты обработки полученных за 6 месяцев данных приведены на рис. 4.

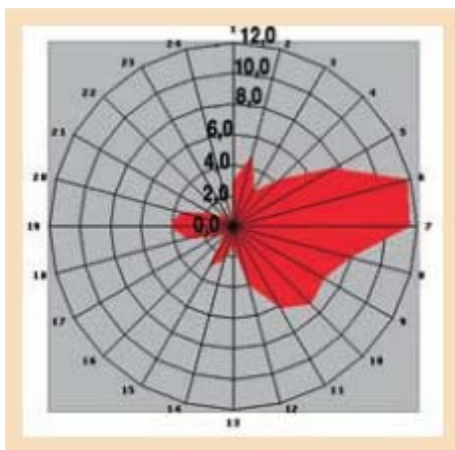


РИС. 4. Распределение переключений на резервный канал по времени суток

Из рис. 4 видно, что основная масса прерываний оптического канала приходится на время суток с 2 часов ночи до 8 утра, что важно учитывать при планировании канала связи и его резервирования. Необходимость и способы резервирования канала связи определяются его применением. Так, например, для использования в корпоративных сетях перерывы связи в нерабочее время могут быть вообще незаметны.

#### Заключение

Статистические результаты работы гибридного радиооптического беспроводного канала связи на трассе протяженностью 4,5 км убедительно подтверждают гипотезу [1] о высокой надежности такого решения. Использование только FSO-оборудования не позволяет на столь длинных пролетах получить приемлемую надежность канала ни при каких условиях. Введение в состав FSO-оборудования относительно доступного радиоканала дает возможность поднять надежность соединения практически до уровня операторской. При этом в течение более 96% времени обеспечивается канал с пропускной способностью, равной волоконно-оптическим соединениям, и только несколько процентов времени канал работает на характерных для радиотехнологий скоростях, т.е. порядка 10 Мбит/с.

Наиболее критичным моментом использования резервного канала с пониженной скоростью передачи является ситуация, когда объем передаваемого трафика в момент переключения превосходит возможности передачи в этом канале. Очевидно, что разные приложения будут по-разному реагировать на резкое уменьшение пропускной способности соединения. Этот вопрос, безусловно, требует дополнительного изучения. Однако полученные результаты показывают, что время работы резервного канала практически сосредоточено в часы наименьшей нагрузки (в ночные и утренние), что позволяет применять такие каналы и в ответственных приложениях, поскольку переход на пониженную скорость передачи практически не ощутим.